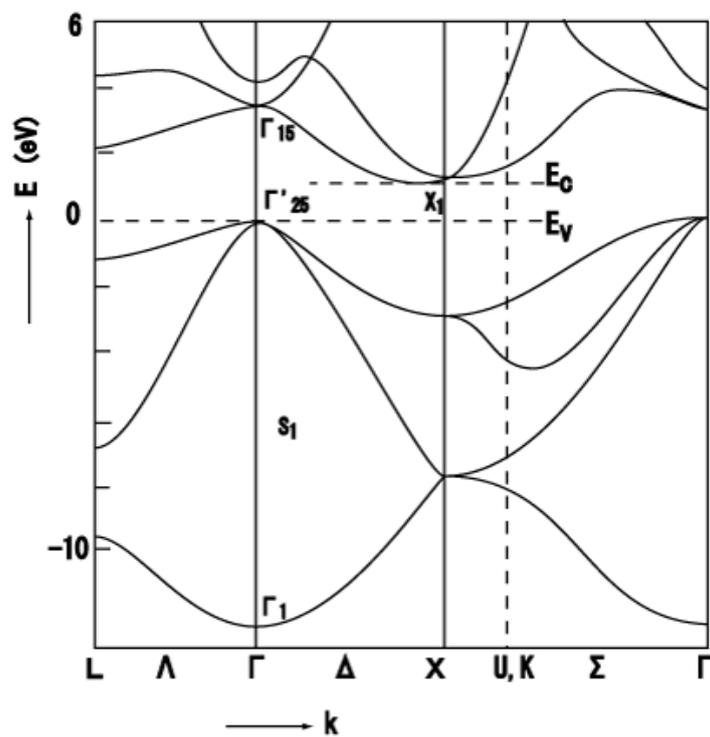


---

## M18 : Matériaux semi-conducteurs

---



26 novembre 2014

NB : Ce compte-rendu n'a pas encore été relu par la personne ayant présenté la leçon. Il sera remplacé par une version définitive plus tard : des erreurs peuvent donc encore subsister.

## Introduction

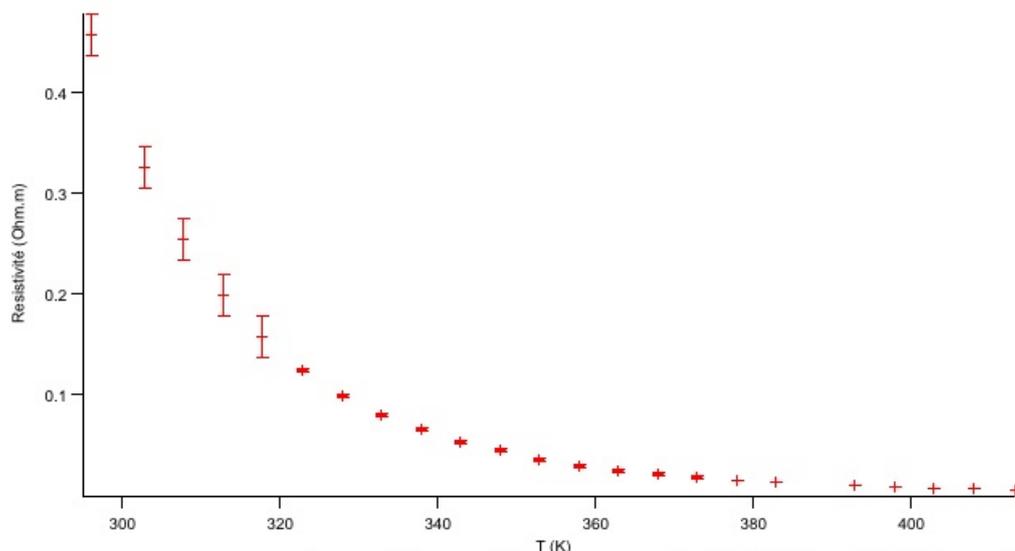
On rappelle rapidement les caractéristiques électriques des semi-conducteurs : conductivité entre celle d'un isolant et d'un conducteur (qui varie avec la température, le dopage et l'éclairement), et existence d'une bande interdite liée à une énergie de gap de l'ordre de 1 eV (la dizaine d'eV pour un isolant).

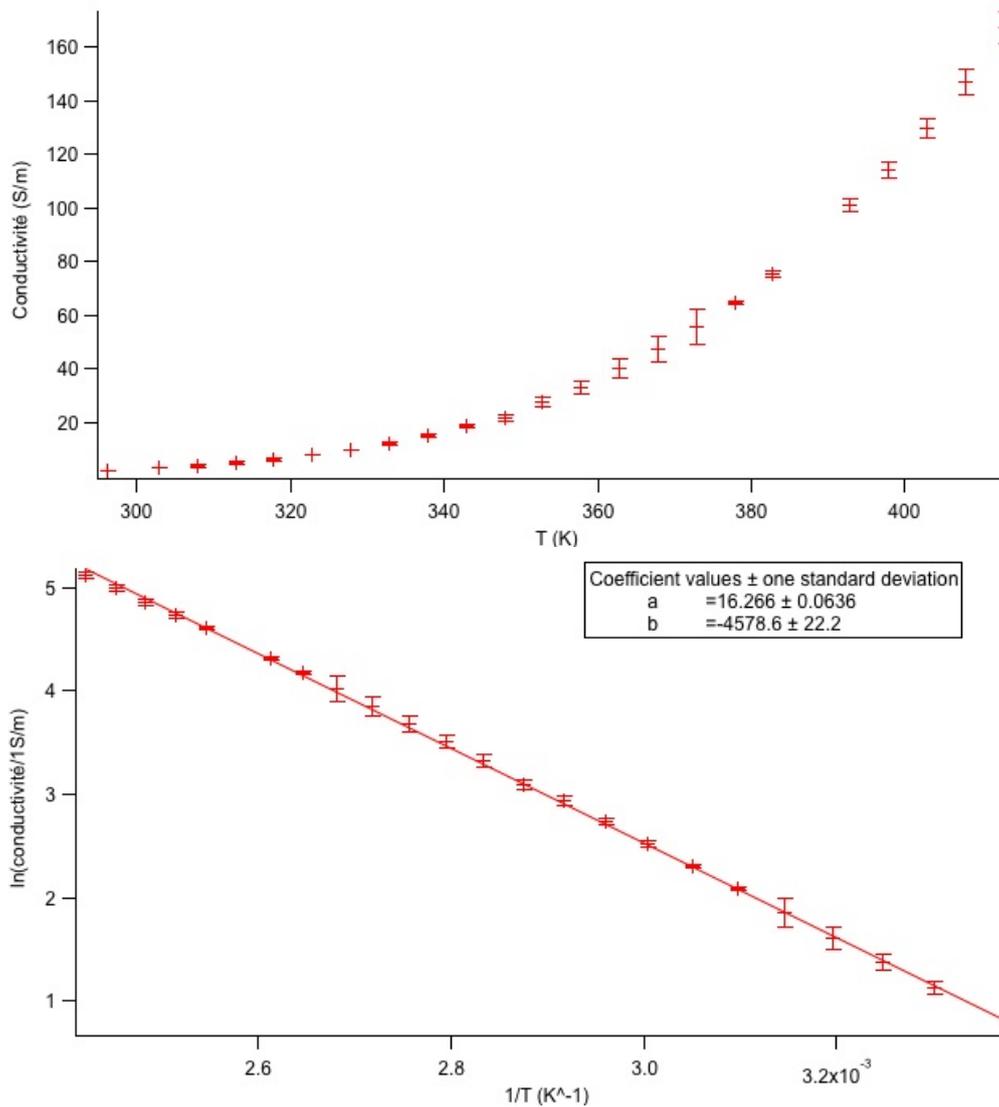
Les commentaires portant sur la partie manip du montage seront écrits [en bleu](#).

## I : Propriétés thermiques

### 1) Germanium non dopé

On mesure la résistivité et la conductivité de la plaquette (*via* la mesure de la tension et de l'intensité) en faisant varier  $T$  (mais pas  $I$ ). On trouve les courbes suivantes (courbes de préparation + deux points en direct) :



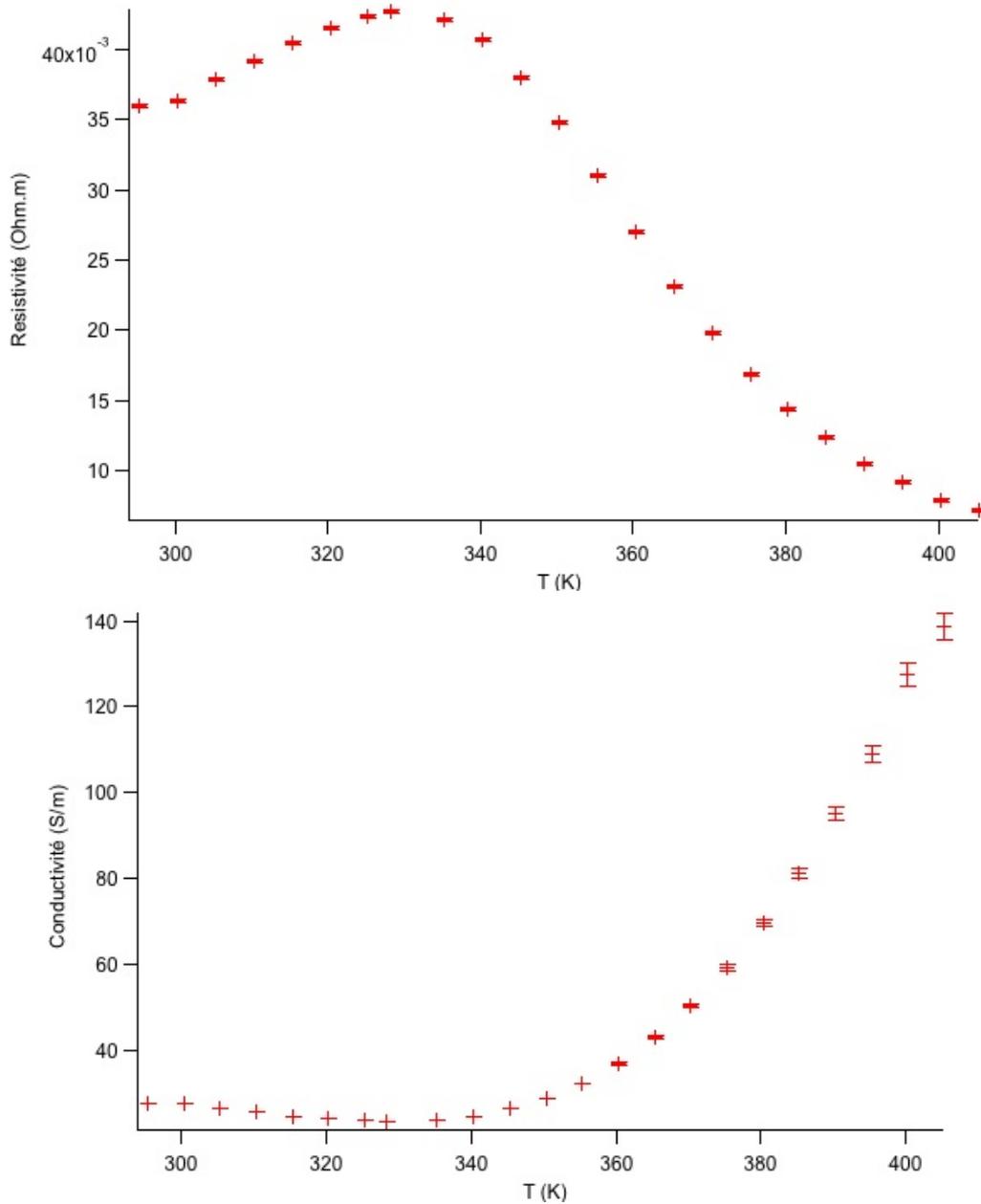


On en déduit par ajustement, vu que  $\sigma = \sqrt{N_c N_v} e^{-E_g/2k_B T}$ , la valeur :  $E_g = 0.79 \pm 0.01$  eV. On peut comparer à la valeur tabulée :  $E_{g,tab} = 0,67$  eV.

Il faut faire attention à bien mesurer la tension aux bornes du thermocouple *avant* de chauffer pour être sûr de l'origine des températures. Nous avons pris des températures en chauffant d'abord, puis en tentant de stabiliser la température en jouant sur la molette de chauffage, mais cela peut être un peu maladroit dans la mesure où on ne thermalise alors pas plus qu'en température montante (et du coup, il n'y a pas vraiment d'avantage à prendre des points en température descendante).

## 2) Germanium dopé p

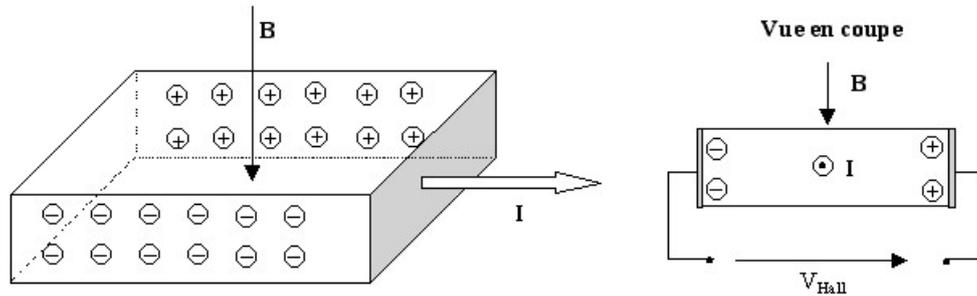
On a repris des mesures pour  $\rho$  et  $\sigma$  en préparation (mais pas en live par manque de temps) :



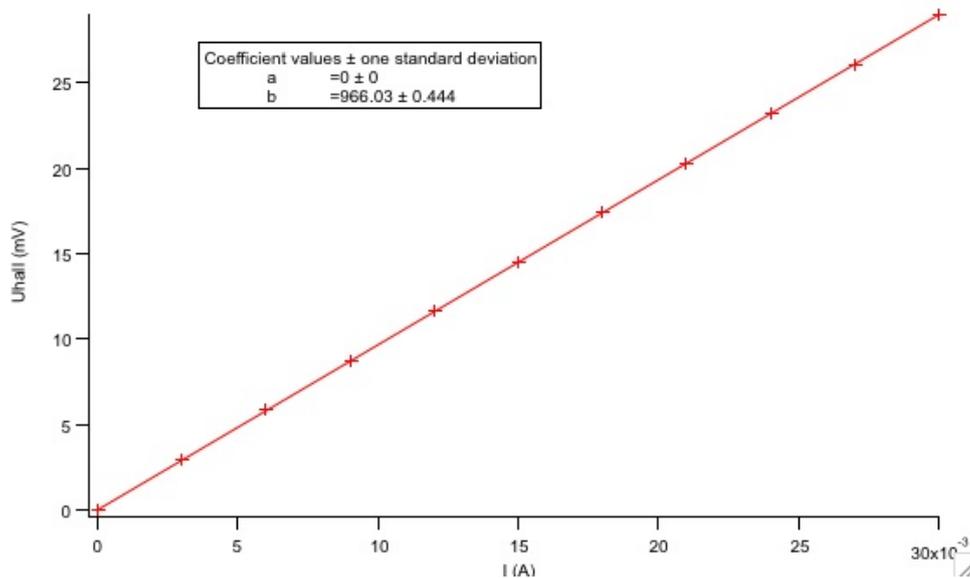
On mesure aussi la résistivité de l'échantillon à l'ambiante (ça sert par la suite). On trouve :  
 $\rho^{300K} = 0,038 \pm 0,0015 \Omega.m$

## II : Effet Hall

### 1) À température fixe



En notant  $a$  et  $b$  les longueurs transverses au courant, on a  $\vec{j} = \frac{I}{ab} \vec{e}_y = nq\vec{v}$ , d'où  $\overline{V_H} = \frac{IB}{nqb}$  et  $n = \frac{IB}{b\overline{V_H}q}$ . On peut alors mesurer, pour différentes valeurs du courant traversant la plaquette, les tensions de Hall associées. Cela donne :



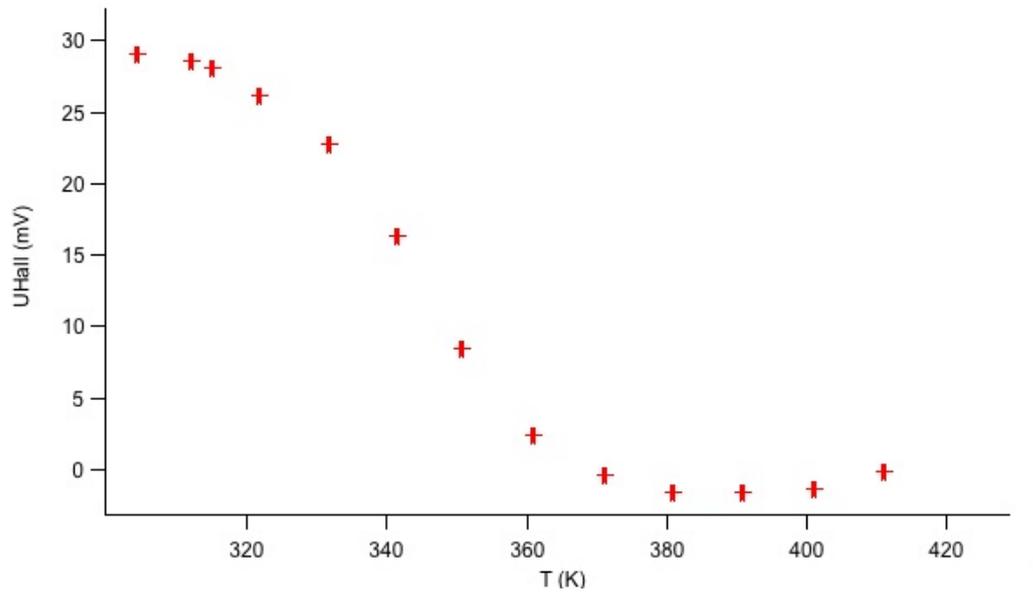
On trouve alors, par ajustement :  $n^{300K} = 5,9 \times 10^{20} \pm 0,3 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ , et vu la valeur de  $\rho_{\text{dopé}}^{300K}$ , on a  $\mu^{300K} = \frac{\sigma}{ne} = 0,28 \pm 0,02 \text{ m}^2/\text{Vs}$

Pour imposer le champ, il faut empaler deux bobines (alimentées par les grosses alim 2 A) sur un électroaimant en U, puis faire tenir des pointes cylindre-conique en regard l'une de l'autre avec des serre-joints (tout est normalement dans la grosse boîte en bois où se trouvent les plaquettes de Germanium). Il faut faire attention à bien mettre en regard, non les parties pointues, mais les parties plates, de façon à avoir un champ le plus uniforme possible sur toute la section de semi-conducteur. Pour connaître le sens de  $\vec{B}$ , on peut suivre l'enroulement de la bobine, et pour connaître le sens de  $I$  au niveau de la plaquette, on peut faire une mesure au petit volt-mètre de  $U_{\text{long}}$  directement aux bornes du matériau, sur le circuit imprimé : dans la convention récepteur,  $I$  est dans le sens opposé à  $U_{\text{long}}$ . De même pour le sens de  $U_H$  (intéressant pour discuter du signe des porteurs de charge).

## 2) À température variable

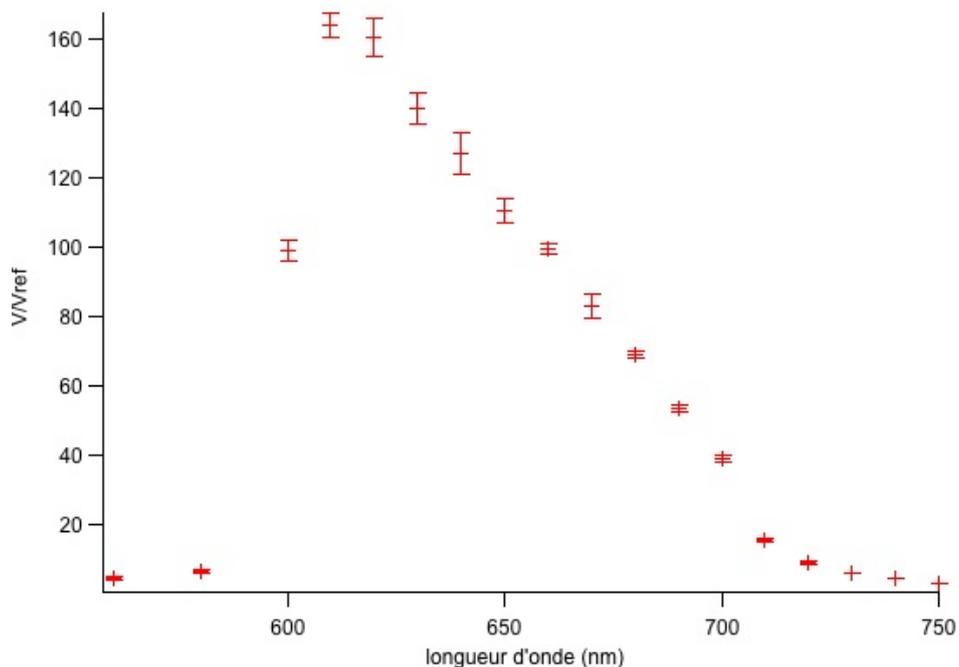
On a tracé la courbe en préparation et on ne reprend pas de points en live sur cette manip par manque de temps. On discute des différentes zones (conduction d'abord assurée par les

trous, puis recombinaison avec les électrons qui sont peu à peu libérés thermiquement, et enfin, conduction assurée par les électrons en majorité et inversion du signe de  $U_H$  correspondant).



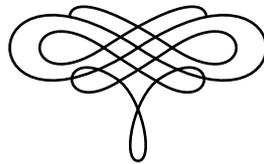
### III : Effet photovoltaïque

On fait une référence au pyromètre dont on suppose la réponse spectrale indépendante de  $\lambda$  dans la bande de longueurs d'onde utilisée (la référence donne donc en fait la fonction d'appareil). On prend ensuite des points au panneau solaire. Pour le schéma de l'expérience, voir la feuille scannée. Pour les résultats :



On en déduit, en mesurant la longueur d'onde à partir de laquelle la cellule photovoltaïque ne transmet plus (les photons ne permettent plus aux électrons de passer de la bande de valence à la bande de conduction) :  $\varepsilon_{\text{gap}} = 1,70 \pm 0,02 \text{ eV}$

Il est nécessaire, vu que le pyro ne voit pas les signaux continus, de hacher optiquement le signal avec un chopper. Cela permet de plus, *via* une mesure de fréquence, de vérifier que le signal qu'on récupère est bien celui qu'on attend et non du bruit à 50 Hz. De plus, comme le signal du pyro est extrêmement mauvais, il vaut mieux l'amplifier et le filtrer (demander à Galais le vieux filtreur). Le signal obtenu est alors normalement propre, mais il arrive souvent que l'ampli ne marche qu'à moitié... Concernant la mesure de  $\varepsilon_{\text{gap}}$ , il vaut mieux prendre le  $\lambda$  « à droite » : cela correspond en effet au moment où le premier électron arrive à franchir le gap. Idéalement, il faudrait aussi prendre en compte la largeur de l'émission du monochromateur, de l'ordre de 25 nm (d'ailleurs, les valeurs lues au monochromateur sont à multiplier par deux : il envoie donc de la lumière de 600 à 1200 nm).



**Questions :** • *Quelle est la gamme du visible, en eV? Cela va de 3,2 à 1,7 eV; le jaune est à peu près à 2 eV. On peut d'ailleurs faire une manip d'introduction où on déduit de la couleur de petites plaquettes de semi-conducteurs la valeur de leurs gaps.*

• *Il y a eu quelques questions sur la manière dont on prenait les mesures (la plaquette est en quelque sorte une boîte noire où on n'a accès qu'aux valeurs finales), et à l'écart des points entre la préparation et l'oral. Le fait est que la préparation a eu lieu avant les TP des L3, et que nous n'étions pas sûrs d'avoir récupéré exactement la même plaquette (il y a notamment deux plaquettes non dopées).*

• *Quel est le sens de variation de  $\rho$  dans un métal? C'est l'inverse que dans un semi-conducteur : la résistivité augmente avec la vitesse des porteurs à cause des chocs contre les atomes du cristal. On demande aussi de détailler, sur les courbes, quels sont les différents régimes (intrinsèque, extrinsèque saturé), et à quoi ils correspondent (apparemment, le jury veut vraiment entendre ces termes et il faut absolument s'appesantir dessus).*

• *Quelle est l'évolution de  $\mu$  avec la température? Ordre de grandeur à l'ambiante? Y a-t-il une différence entre la mobilité des électrons et celle des trous? On a :  $\mu(T) \propto T^{-3/2}$ , et à l'ambiante,  $\mu_{\text{trous}}^{300K} \simeq 500 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  et  $\mu_e^{300K} \simeq 1500 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ . Il y a donc une différence, due au fait que les trous ont une masse effective plus élevée que celle des électrons, et qu'ils se déplacent donc plus lentement.*

• *Où se trouvent, sur un diagramme énergétique, les niveaux d'impuretés? Les niveaux seront proches de la bande de conduction pour un dopé n et proches de la bande de valence pour un dopé p. Les écarts énergétiques sont généralement de l'ordre de 0,1 eV.*

• *Quelle est la densité d'impuretés pour un semi-conducteurs dopé? Pour un non dopé? Il y a de l'ordre de  $10^{28}$  atomes, donc électrons, par  $\text{m}^3$  de matière, et on dope généralement à des taux de  $10^{20} - 10^{22} \text{ m}^{-3}$  pour un dopé. Pour un non dopé, il existe toujours des impuretés résiduelles,*

qui sont de l'ordre de  $10^{15} - 10^{16} \text{ m}^{-3}$  pour le Germanium, qui est le semi-conducteur qu'on sait faire, aujourd'hui, de la façon la plus pure.

**Commentaire :** Il faudrait idéalement traiter de plus d'applications. On a un peu traîné pendant la présentation, mais il est possible de tout caser et d'ajouter encore une autre application, comme la mesure du spectre d'une led. On peut également remplacer le panneau solaire par la photodiode (plus judicieux selon le correcteur), traiter de la photorésistance (mais attention aux montages longues et courtes dérivation)... Il faut également plus mettre en avant les différents régimes de température (intrinsèque/extrinsèque/extrinsèque saturé) et bien les détailler, ainsi que connaître des ordres de grandeurs, et rapprocher les mesures faites de valeurs tabulées. Enfin, concernant le choix de traiter le dopé p ou n, il vaut mieux traiter le dopé p : il y a alors plus de choses à dire sur  $\sigma(T)$  et  $U_H(T)$ .

\*  
\* \*

- Références :**
- *Introduction à la physique de l'état solide*, Charles Kittel, pour la théorie.
  - *Optique expérimentale*, Sextant, pour la partie optique.
  - *Physique des semi-conducteurs*, Christian et Hélène Ngô, pour la théorie.